第 38 卷第 4 期
2018 年 2 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.4
Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201701090067
严应存,赵全宁,王喆,豆青芳.青海省门源县 1980—2015 年青稞物候期变化趋势及其驱动因素.生态学报,2018,38(4):1264-1271.
Yan Y C,Zhao Q N,Wang Z,Dou Q F.Analysis of highland barley phenophase change trend and the driving factors in Menyuan County, Qinghai Province during 1980—2015.Acta Ecologica Sinica,2018,38(4):1264-1271.

青海省门源县 1980—2015 年青稞物候期变化趋势及其驱动因素

严应存[1,2,*],赵全宁[1,2],王　喆[1,2],豆青芳[1,3]

1 青海省气象科学研究所,西宁 810001
2 青海省防灾减灾重点实验室,西宁 810001
3 门源县气象局,海北 810399

摘要:利用 1980—2015 年青海省门源县农业气象站的青稞物候期及平行气温和降水资料,分析了气候变化背景下青海省门源县青稞物候期变化趋势及其驱动因素,结果表明:播种、出苗和拔节期呈推迟趋势,其余物候期均呈提前趋势。其中播种期以 2.65d/10a 的趋势显著推迟,分蘖期、抽穗期分别以 4.78d/10a 和 2.30d/10a 的趋势显著提前。显著影响青稞物候期的气候因子为气温、降水和积温。播种前 0℃活动积温升高 1℃·d,期间降水量增加 1mm,播种期推迟 0.252d;稳定通过 0℃积温增加 1℃·d,分蘖期提前 0.026d;4 月最低气温升高 1℃,抽穗期提前 1.890d。自 20 世纪 90 年代出现播种推迟、分蘖期和抽穗期提前、驱动因子升高突变现象。物候期与驱动因素开始突变基本同步,表明青海高原气候变暖是青稞物候期变化的主导因素。

关键词:青海省门源县;春青稞;物候期变化;驱动因素

Analysis of highland barley phenophase change trend and the driving factors in Menyuan County, Qinghai Province during 1980—2015

YAN Yingcun[1,2,*],ZHAO Quanning[1,2],WANG Zhe[1,2],DOU Qingfang[1,3]

1 *Qinghai Province Institute of Meteorological Sciences, Xining* 810001, *China*
2 *State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Qinghai Province, Xining* 810001,*China*
3 *Meteorological Bureau of Menyuan County of Qinghai Province, Haibei* 810399,*China*

Abstract: Highland barley phenophases and parallel temperature and precipitation data at the Menyuan Agricultural Meteorological Station, Qinghai Province, from 1980 to 2015, were used to analyze the change trend of highland barley phenology and its driving factors under a climate change background in Menyuan County, Qinghai Province. The results indicated that the sowing, seedling, and jointing stage tended to be delayed, whereas the phenological period overall was advanced. Sowing stage was significantly delayed by 2.65d/10a, and the tillering and heading stage were advanced by 4.78d/10a and 2.30d/10a, respectively. The climatic factors that significantly affected the phenological periods of highland barley were temperature, precipitation, and accumulated temperature. When 0℃ accumulated temperature before sowing increased by 1℃ and precipitation increased by 1mm, sowing was delayed by 0.252d. When stable accumulated temperature increased by 1℃, the tillering stage was advanced by 0.026d, and when minimum temperature in April increased by 1℃, the heading stage advanced by 1.890d. Since the 1990s, the sowing stage delayed, the tillering stage and heading stage advanced, and the driving factors increased. The phenological period and the driving factors began to change at the same

基金项目:青海防灾减灾重点实验室项目(2017-ZJ-Y28);青海省气象局重点项目;青海省科技厅重点项目(2017-SF-131)
收稿日期:2017-01-09;　**网络出版日期**:2017-11-12

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yanyingcun@ sohu.com

time, which indicated that the plateau of climate warming in Qinghai was the dominant factor determining the phenological changes of highland barley.

Key Words: Menyuan County, Qinghai Province; spring highland barley; phenophases change; driving factors

生物物候变化是指示气候等环境变化的综合指标,分析生物物候变化对于评价生态系统对近期气候变化的快速响应、确定植被的碳吸收期和地表与大气之间水分、能量的季节性交换特征及其对全球碳循环和气候变化的反馈作用,具有重要的科学意义[1-2]。青稞的种植范围包括整个青藏高原地区的西藏自治区和青海、四川、甘肃、云南四省藏区。全区域的青稞种植比例由外向内逐步加大并随海拔高度增高而增加,在海拔高度4200m 以上的农田,青稞是唯一种植作物[3]。研究作为青藏高原上农作物种植上限的青稞物候期变化及其驱动力,对气候变化对农作物影响具有指示性意义。在全球变化研究的推动下,学界对全球变化下自然植被物候期的变化研究已取得了很大的进展[4-15],对作物物候期也有一定的研究[16-28]。青稞由于种植区域的集中和观测资料较少的局限,其研究主要集中在气象条件对生长发育及产量的影响[29-32]、品种遗传[33-34]、文化[35]和施肥[36-37]等方面,而对于青稞物候期变化的探索则有待加强。本文通过门源 1980—2015 年青稞播种-成熟物候期及其平行气温和降水资料,分析青海省青稞物候期变化及其对水热条件的响应,以期为农作物响应气候变化及青海省青稞种植提供科学决策依据。

1　研究区与数据

1.1　研究区概况

门源回族自治县位于青海省东北部,37.5°—38°N,102°—102.5°E。东北与河西走廊中部的甘肃省天祝、肃南、山丹县接壤,南接本省大通、互助县,西与本州祁连、海晏县毗邻。境内山地面积占 83.1%,盆地面积16.9%,海拔高度在 2388—5254m 之间,具有典型的日照时间长、太阳辐射强、昼夜温差大等高原寒温湿润性气候特征。全年日照时数 2264.8—2739.8h,气温日较差 11.6—17.5℃,年平均气温 0.8℃,年平均降水520mm。门源农牧资源丰富,全地区耕地面积 4×10^4 hm^2,农作物以油菜、青稞为主,兼种豌豆、小麦、马铃薯、蔬菜等,是青海省最大的商品油料基地、藏区青稞制种基地和蜂产品生产重点县。

1.2　资料与方法

1.2.1　资料来源

文中门源站 1980—2015 年青稞播种-成熟物候期(1999—2000 年、2003—2006 年停测)、气温和降水资料来源于青海省气象局信息中心。青稞物候期观测方法根据《农业气象观测规范》(上卷)作物分册。

1.2.2　研究方法

采用气候倾向率和累积距平分析气候变化趋势,突变检测采用曼-肯德尔(Mann-Kendall)法,气候变化影响采用相关系数法和逐步回归法。

气候倾向率计算如下:

$$\hat{x}_i = a + bt \tag{1}$$

式中:$\hat{x}_i$ 为作物物候期时间序列;t 为研究时间,本文研究时段为 1980—2015 年,t 取值依次为 1,2,…,n,其中 $n=29$;b 为回归系数,通常乘以 10 表示为气候倾向率,d/10a;a 为回归常数。

对于某农业气象要素时间序列第 t 年的累积距平为:

$$\hat{x} = \sum (x_i - \bar{x}) \tag{2}$$

式中:$\hat{x}$ 为累积距平(d);x_i 为农业气象要素在第 t 年前第 i 年的值(d);$\bar{x}$ 为农业气象要素的平均值(d)。

相关系数和逐步回归利用 SPSS 17.0 计算。

2 结果与分析

2.1 青稞物候期特征

青稞物候期包括播种、出苗、三叶、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、开花、乳熟和成熟(表 1)。门源青稞 3 月 30 日—4 月 18 日播种,4 月 28—5 月 12 日出苗,5 月 8 日—25 日三叶,5 月 20 日—6 月 13 日分蘖,6 月 9 日—28 日拔节,6 月 22 日—7 月 8 日孕穗,6 月 28 日—7 月 18 日抽穗,7 月 5 日—30 日开花,7 月 22 日—8 月 16 日乳熟,8 月 15 日—9 月 5 日成熟。

表 1 青稞物候期特征值

Table 1 Characteristic value of highland barley phenophase

物候期 Phenophase	播种 Sowing	出苗 Seeding	三叶 Threeleaf	分蘖 Tillering	拔节 Jointing	孕穗 Booting	抽穗 Heading	开花 Bloom	乳熟 Milky maturity	成熟 Maturity
最早 Earliest	3 月 30 日	4 月 28 日	5 月 8 日	5 月 20 日	6 月 9 日	6 月 22 日	6 月 28 日	7 月 5 日	7 月 22 日	8 月 15 日
平均 Average	4 月 8 日	5 月 3 日	5 月 17 日	5 月 30 日	6 月 18 日	6 月 28 日	7 月 7 日	7 月 14 日	8 月 4 日	8 月 26 日
最晚 Latest	4 月 18 日	5 月 12 日	5 月 25 日	6 月 13 日	6 月 28 日	7 月 8 日	7 月 18 日	7 月 30 日	8 月 16 日	9 月 5 日

2.2 青稞物候期变化趋势

2.2.1 青稞物候期年际变化

计算门源站近 29a 青稞各物候期气候倾向率表明(表 2),播种、出苗和拔节期呈推迟趋势,其中播种期以 2.65d/10a 的趋势显著推迟,其余趋势不显著;三叶、分蘖、孕穗、抽穗、开花、乳熟和成熟均呈提前趋势,其中分蘖期以 4.78d/10a 的趋势极限著提前,抽穗 2.30d/10a 的趋势显著提前,其余物候期提前趋势不显著。可见播种期的推迟,并不意味着后期物候期推迟,反之后期大部分物候期提前。

表 2 1980—2015 年青稞物候期变化气候倾向率

Table 2 Highland barley phenology change climate tendency rate during 1980—2015

物候期 Phenophase	趋势线 Trendline	R^2	R	物候期 Phenophase	趋势线 Trendline	R^2	R
播种 Sowing	$y=0.265x+94.57$	0.175	0.418*	孕穗 Booting	$y=-0.153x+182.5$	0.104	0.322
出苗 Seeding	$y=0.124x+121.9$	0.093	0.305	抽穗 Heading	$y=-0.230x+192.1$	0.222	0.471*
三叶 Threeleaf	$y=-0.030x+138.6$	0.004	0.063	开花 Bloom	$y=-0.187x+198.7$	0.088	0.297
分蘖 Tillering	$y=-0.478x+157.8$	0.397	0.630**	乳熟 Milky maturity	$y=-0.059x+217.1$	0.009	0.095
拔节 Jointing	$y=0.009x+170.0$	0.000	0.000	成熟 Maturity	$y=-0.123x+240.7$	0.048	0.219

表中带“*”表示气候倾向率通过 0.05 检验水平的显著性检验;带“**”表示倾向率通过 0.01 检验水平的显著性检验

计算门源站近 29a 青稞各物候期累积距平表明,播种期和出苗期的累积距平为负值,其余物候期累积距平大部为正值,表明大部分物候期呈提前趋势。各物候期累积距平的变化除三叶和乳熟期变化规律不明显外,拔节呈四次多项式分布,其余均呈二次多项式分布,拟合优度 0.381-0.913,通过 EXCEL 中 LINEST 和 FINV 函数计算二次多项式曲线的参数,F 值为 5.712-137.190,$F_{0.01(2,26)}=5.526$ 和 $F_{0.01(4,24)}=4.218$,表明门源青稞大部分物候期累积距平随时间呈显著二次多项式曲线变化(表 3)。

2.2.2 青稞物候期变化突变诊断

采用曼-肯德尔(Mann-Kendall)法进行突变检测 1980—2015 年变化趋势显著的物候期如播种、分蘖和抽穗。给定显著性水平 a=0.05,即 $\mu_{0.05}=\pm1.96$,计算结果绘成图 1。

从曲线可见,自 20 世纪 90 年代后期以来,播种期有一明显的推迟趋势,2009—2015 年播种期推迟趋势均超过显著性水平 0.05 临界线。根据 UB 和 UF 曲线交点的位置,确定播种期 20 世纪 90 年代的推迟是一突变现象,具体均是从 1997 年开始的;分蘖期自 20 世纪 90 年代中期以来有一明显的提前趋势,2001—2015 年

提前趋势均超过显著性水平 0.05 临界线。根据 UB 和 UF 曲线交点的位置,确定分蘖期 20 世纪 90 年代的提前是一突变现象,具体是从 1996 年开始的。抽穗期自 20 世纪 90 年代初期有一明显的提前趋势,2001—2010 年提前趋势超过显著性水平 0.05 临界线。根据 UB 和 UF 曲线交点的位置,确定抽穗期 20 世纪 90 年代的推迟是一突变现象,具体是从 1994 年开始的,且 2010-2015 年间又出现波动突变现象,从现有资料看,仍呈提前趋势。

表 3　1980—2015 年青稞物候期变化趋势

Table 3　Highland barley phenology change trend during 1980—2015

物候期 Phenophase	趋势线 Trendline	F	$F_{0.01}$	R^2	R
播种 Sowing	$y=0.208x^2-6.369x+13.749$	41.147**	5.526	0.873	0.934
出苗 Seeding	$y=0.059x^2-1.724x-3.308$	14.584**	5.526	0.529	0.727
三叶 Threeleaf	$y=-0.016x^2+0.384x+3.250$	1.371	5.526	0.095	0.308
分蘖 Tillering	$y=-0.243x^2+6.321x+4.633$	137.190**	5.526	0.913	0.956
拔节 Jointing	$y=0.001x^4-0.036x^3+0.547x^2-2.875x+9.568$	5.712**	4.218	0.488	0.699
孕穗 Booting	$y=0.083x^2+2.406x+2.769$	15.201**	5.526	0.539	0.734
抽穗 Heading	$y=-0.119x^2+2.683x+6.753$	43.255**	5.526	0.769	0.877
开花 Bloom	$y=-0.109x^2+3.344x-5.419$	7.991**	5.526	0.381	0.617
乳熟 Milky maturity	$y=0.001x^2-0.137x+9.954$	0.247	5.526	0.019	0.138
成熟 Maturity	$y=-0.019x^2+0.163x+10.358$	13.518**	5.526	0.510	0.714

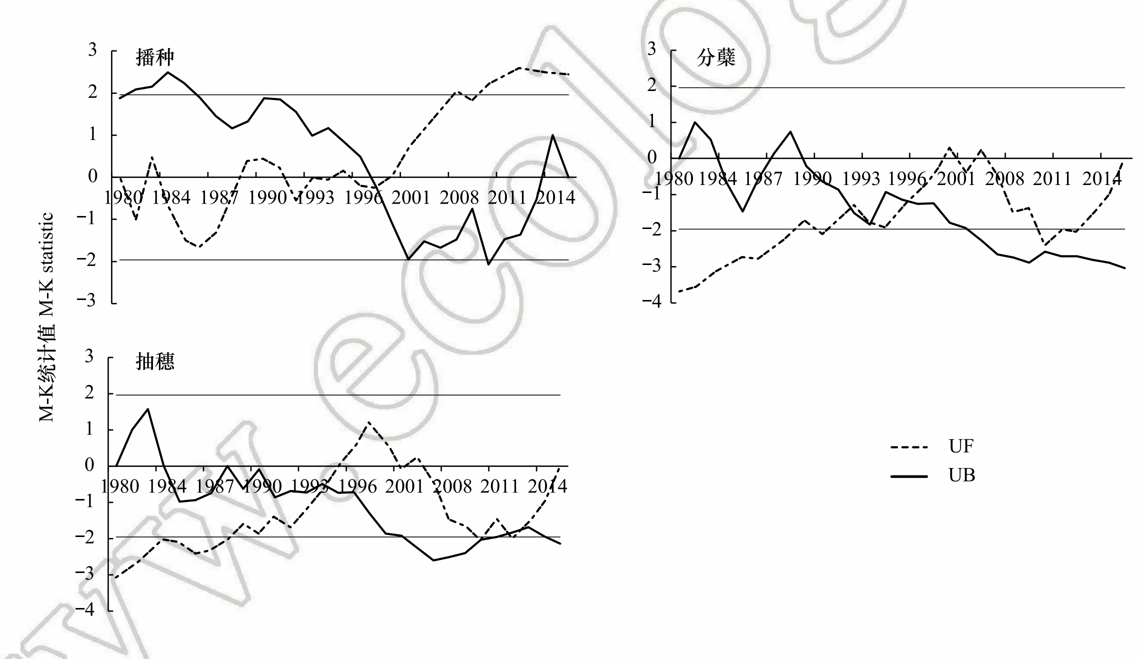


图 1　青稞物候期 M-K 突变检验(UF、UB 分别代表正向序列和反向序列)

Fig.1　M-K nonparametric test of highland barley phenology (UF and UB represent the progressive and retrograde series, respectively)

2.3　气候变化对青稞物候期变化的影响

2.3.1　青稞物候期与气象条件的相关系数分析

计算门源青稞随时间变化趋势显著的播种、分蘖和抽穗与前期气候因子(上年 9 月—当年 8 月气温和降水)的相关系数(表 4)。可以看出影响播种期的主要因子是温度和降水,与 0℃ 活动积温、期间降水、稳定通过 0℃、3℃ 的积温呈显著正相关,积温(最低气温)越高,播种期越推迟,播前降水越多,播种期亦推迟。影响分蘖的因子主要为 2—4 月平均气温和最高气温,2—5 月最低气温,稳定通过 0℃ 和 3℃ 初日和积温,0℃ 活动积温和期间平均气温。其中分蘖期与稳定通过 0℃ 和 3℃ 初日呈显著正相关,与其余因子均呈显著或极显著负相关。影响抽穗期的因子则为 2 月、4 月平均气温和最高气温、4—5 月最低气温、稳定通过 3℃ 和 5℃ 初日、

稳定通过0℃、3℃和5℃积温。其中抽穗期与稳定通过3℃和5℃初日呈极显著正相关，与其余因子均呈显著或极显著负相关，表明界限温度初日越晚，分蘖（抽穗）出现越晚，界限温度积温（前期气温）越高，分蘖越早。

表 4 气温和降水与物候期的相关系数

Table 4 Correlation of temperature and precipitation between highland barley phenophase

物候期 Phenophase	T2	T3	T4	$T2_{max}$	$T3_{max}$	$T4_{max}$	$T2_{min}$
播种 Sowing							
分蘖 Tillering	−0.381 *	−0.483 ***	−0.587 ***	−0.413 *	−0.446 **	−0.484 ***	−0.392 *
抽穗 Heading	−0.388 *		−0.504 ***	−0.422 *		−0.433 **	

物候期 Phenophase	$T3_{min}$	$T4_{min}$	$T5_{min}$	$DATE0_S$	K0	$DATE3_S$	K3
播种 Sowing					0.430 **		0.450 **
分蘖 Tillering	−0.473 ***	−0.576 ***	−0.549 ***	0.440 **	−0.624 ***	0.437 **	−0.554 ***
抽穗 Heading		−0.542 ***	−0.524 ***		−0.524 ***	0.472 ***	−0.475 ***

物候期 Phenophase	$DATE5_S$	K5	$K0_{before}$	$T0_{before}$	$P0_{before}$
播种 Sowing			0.678 ***		0.480 **
分蘖 Tillering			−0.522 ***	−0.576 ***	
抽穗 Heading	0.480 ***	−0.483 ***			

表中T2、T3、T4分别表示2月、3月和4月平均气温（℃），$T2_{max}$、$T3_{max}$、$T4_{max}$分别表示2月、3月和4月最高气温（℃），$T2_{min}$、$T3_{min}$、$T4_{min}$和$T5_{min}$分别表示2月、3月、4月和5月最低气温（℃）；K0、K3和K5分别表示稳定通过0℃、3℃和5℃界限温度的积温（℃·d）；$DATE0_S$、$DATE3_S$、$DATE5_S$分别表示稳定通过0℃、3℃和5℃的初日；$K0_{before}$、$T0_{before}$和$P0_{before}$分别表示3月1日至播种前0℃活动积温（℃·d）、平均气温和降水（mm）

2.3.2 青稞物候期逐步回归法拟合

虽然各阶段气候因子均影响青稞物候期，但利用SPSS 17.0统计软件中逐步回归法拟合（表5）表明，显著影响青稞物候期的因素主要是气温、降水和积温。播种前0℃活动积温升高1℃·d，期间降水量增加1mm，播种期推迟0.252d。稳定通过0℃积温增加1℃·d，分蘖期提前0.026d；4月最低气温升高1℃，抽穗期提前1.890d。

表 5 青稞物候期逐步回归方程

Table 5 Highland barley phenophase stepwise regression equation

物候期 Phenophase	逐步回归方程 Stepwise regression equation	*R*	*F*	*Sig*
播种 Sowing	$y=91.469+0.148K0_{before}+0.104P0_{before}$	0.708	13.092	0.000
分蘖 Tillering	$y=195.435-0.026K0$	0.624	17.188	0.000
抽穗 Heading	$y=182.287-1.890T4_{min}$	0.542	11.258	0.002

2.3.3 气候变化及突变检验

分析显著影响青稞物候期的气候因子变化（图2）表明，播种前0℃活动积温、稳定通过0℃积温和4月最低气温自1980年以来呈极显著升高趋势，升高幅度分别为12.130℃·d/10a、116.280℃·d/10a和0.587℃/10a，播种前降水呈波动减少趋势，但趋势不显著。

从门源播种前0℃活动积温、稳定通过0℃积温和4月最低气温M-K突变检验曲线可见，各要素均有一明显的升高趋势。0℃活动积温、稳定通过0℃积温和4月最低气温升高趋势超过显著性水平0.05临界线的时间分别是从2002年、1996年和2003年开始的。根据UB和UF曲线交点的位置，确定0℃活动积温、稳定通过0℃积温和4月最低气温升高是突变现象，具体分别是从1999年、1996年和1996年开始的（图3）。

2.3.4 青稞物候期及其驱动气候因子间突变关系

从表6可以看出，青稞物候期对气候突变响应敏感，开始突变年份和驱动气候因子突变基本同步，显著突

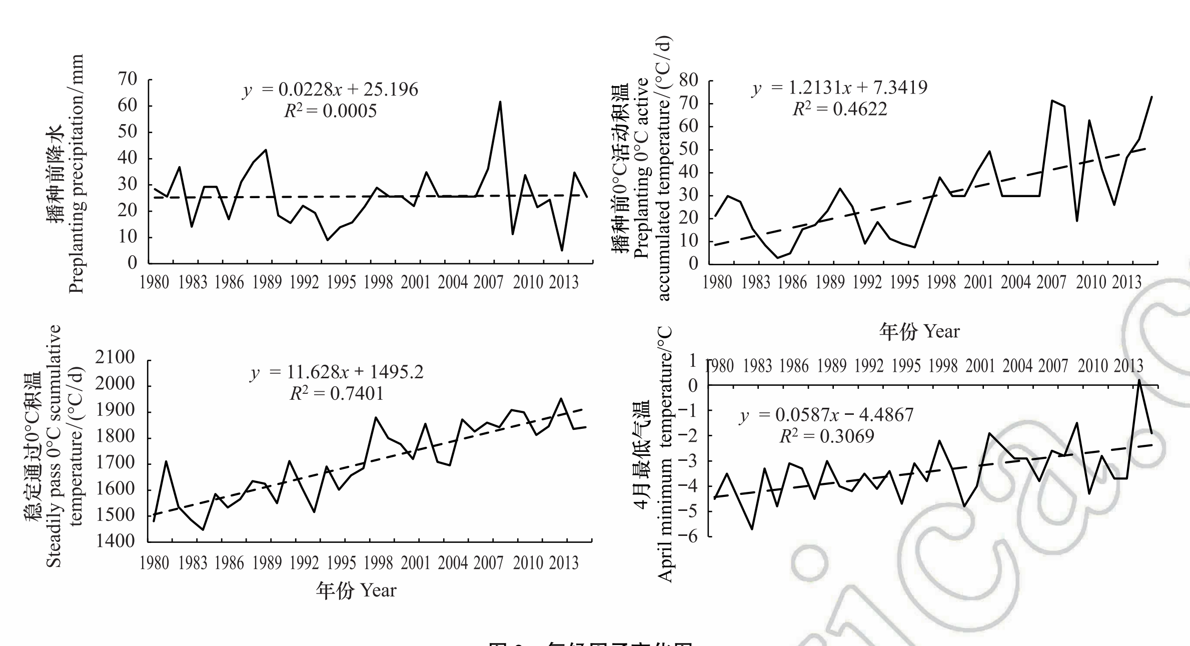


图 2　气候因子变化图

Fig.2　Climate factor change curves

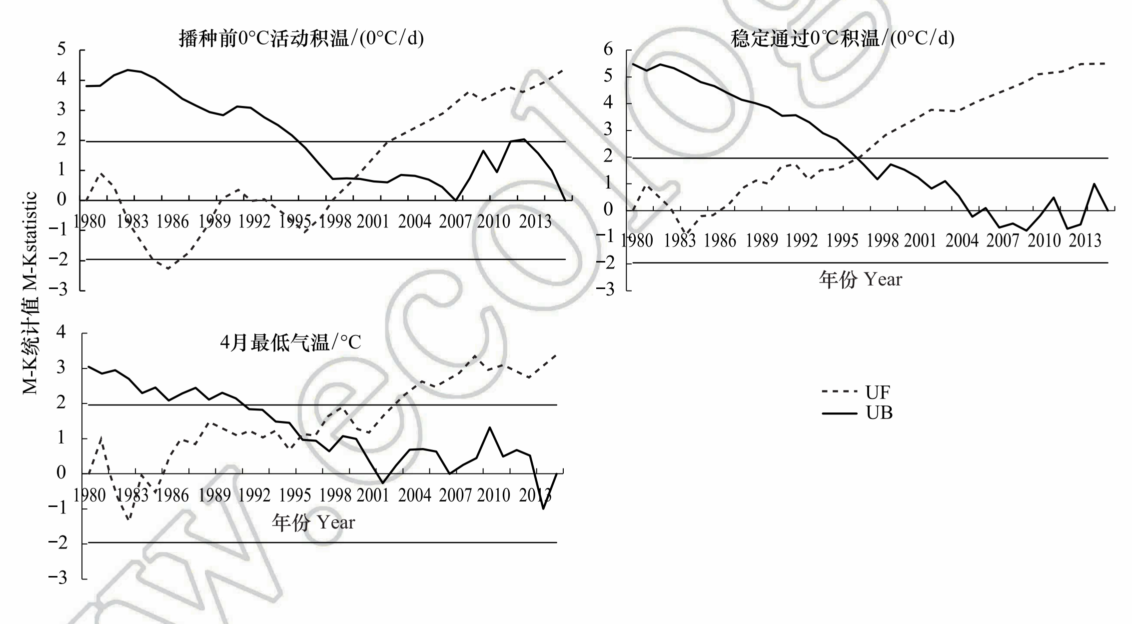


图 3　气候因子 M-K 突变检验曲线图

Fig.3　M-K nonparametric test curves of climate factor change (UF and UB represent the progressive and retrograde series, respectively)

变开始年份播种期和分蘖期较气候驱动因子晚 5—7 年,而抽穗期突变波动出现,表明品种和耕作方式等因素影响所致。

3　结论和讨论

3.1　结论

门源青稞 4 月上中旬播种,8 月中旬—9 月上旬成熟,各物候期早晚相差最大 14—25d。

青稞各物候期 1980—2015 年间随时间变化敏感期主要出现在开花期前,播种、出苗和拔节期呈推迟趋势,其余均提前,其中播种、分蘖和抽穗呈显著或极显著趋势。播种期推迟,后期大部分物候期提前。各物候期累积距平随时间变化大部呈极显著二次多项式曲线变化。

表 6 青稞物候期及其驱动因子突变特征

Table 6 Highland barley phenophase and driver factors abrupt change characteristic

物候期 Phenophase	突变开始年份 Abruptstart year	突变显著开始年份 Abrupt significantstart year	气候因子 The climate factor	突变开始年份 Abruptstart year	突变显著开始年份 Abrupt Significantstart year	物候期对气候变化响应特征 The characteristics of climate change response of phenophase
播种 Sowing	1997	2009	$K0_{before}$/℃·d	1999	2002	播种期和驱动气候要素开始突变基本同步,显著突变晚 7 年
分蘖 Tillering	1996	2001	K0/℃·d	1996	1996	分蘖期和驱动气候因子开始突变同步,显著突变晚 5 年
抽穗 Heading	1994,2013	2001,2014	$T4_{min}$/℃	1996	2003	抽穗期和驱动气候因子突变基本同步,抽穗期突变波动出现

各阶段气温和降水中,除了播种期受 0℃活动积温和期间降水外,显著影响青稞物候期的因素主要是气温。播种前 0℃活动积温升高 1℃·d,期间降水量增加 1mm,播种期推迟 0.252d。稳定通过 0℃积温增加 1℃·d,分蘖期提前 0.026d;4 月最低气温升高 1℃,抽穗期提前 1.890d。

播种期、分蘖期和抽穗期对气候突变响应敏感,开始突变年份和驱动气候因子突变基本同步,而播种期和分蘖期显著突变开始年份较气候驱动因子晚 5—7 年。

3.2 讨论

本研究以春青稞为研究对象,分析了青稞物候期自 1980 年以来随时间变化趋势及其驱动因素。研究中春青稞品种先后为门源亮兰、循化亮兰、莫多吉和北青 8 号,熟性由极早熟-中早熟发展。门源春青稞播种期推迟并没有导致成熟期推迟,相反呈不显著提前趋势,表明气候变暖导致的春青稞物候期提前大于作物品种的作用。研究显示,青藏高原草地植物物候期春季提前,秋季推迟,生长季延长。由于用途不同,作物与草地植物物候期对气候变化的响应关注点不同。草地植物主要关注影响生长季长短的返青和黄枯上,农作物则主要关注播种和成熟。门源青稞播种期推迟,成熟期提前,生长季缩短。可见气候变暖为青藏高原农业生产提供了更充足的热量资源,农作物物候期也随之改变。

值得注意的是青藏高原一般认为顶凌播种有利于高产,0℃初日与作物播种期有密切的关系,但门源却出现了气温升高,播前活动积温升高播种期推迟的现象。分析表明,气候变暖,但门源春、夏、秋、冬和 3 月 1 日—4 月上旬降水变化趋势均不显著,秋季降水呈不显著增加趋势,其余均呈不显著减少趋势。普查门源青稞农业气象灾害主要为霜冻和冰雹干旱,分别占 50%和 33%,主要发生时间为 8 月份的早霜冻, 7 月和 8 月的冰雹。结合青稞播种期与播种前降水量呈正相关表明播种期的改变和冬春季降水减少有关。但分析土壤 0—10cm 解冻后 3 月 28 日相对湿度呈显著增加趋势,这与秋季降水增多蓄水增墒极显著相关($P<0.01$)。通过文中的研究表明,目前门源青稞播种期是否适宜尚待进一步研究,采取顶凌播种、推迟播种或 0—10cm 土壤解冻后播种需通过田间分期播种试验进一步验证,可以肯定的是顶凌播种有利于青稞避免后期早霜冻。因此开展青藏高原农业物侯变化及其驱动,对青藏高原合理利用气候资源,调整农业结构和作物种植制度具有积极的现实意义。

参考文献(References):

[1] 王静,常青,柳冬良.早春草本植物开花物候期对城市化进程的响应——以北京市为例.生态学报,2014,34(22):6701-6710.
[2] 陈效逑,庞程,徐琳,李静,张晴华,尉杨平.中国温带旱柳物候期对气候变化的时空响应.生态学报,2015,35(11):3625-3635.
[3] 藏区青稞生产的现状与发展——青稞高产创建培训资料.[2011-08-17],http://www.docin.com/p-478259100.html.
[4] 丁明军,张镱锂,刘林山,王兆锋.青藏高原植物返青期变化及其对气候变化的响应.气候变化研究进展,2011,7(5):317-323.
[5] 马勇刚,张弛,塔西甫拉提·特依拜.中亚及中国新疆干旱区植被物候时空变化.气候变化研究进展,2014,10(2):95-102.
[6] 徐满厚,薛娴.青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应.生态学报,2013,33(7):2071-2083.
[7] 徐满厚,刘敏,翟大彤,薛娴,彭飞,尤全刚.青藏高原高寒草甸生物量动态变化及与环境因子的关系——基于模拟增温实验.生态学报,

2016,36(18):5759-5767.
[8] 徐维新,辛元春,张娟,校瑞香,王晓明.近 20 年青藏高原东北部禾本科牧草生育期变化特征.生态学报,2014,34(7):1781-1793.
[9] 宋春桥,游松财,柯灵红,刘高焕,钟新科.藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应.生态学报,2012,32(4):1045-1055.
[10] 俎佳星,杨健.东北地区植被物候时序变化.生态学报,2016,36(7):2015-2023.
[11] 张含玉,方怒放,史志华.黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应.生态学报,2016,36(13):3960-3968.
[12] 缪丽娟,蒋冲,何斌,刘强,朱枫,崔雪锋.近 10 年来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应.生态学报,2014,34(5):1295-1301.
[13] 韩福贵,徐先英,王理德,王键,张应昌,韩生慧.民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应.生态学报,2013,33(13):4156-4164.
[14] 柳晶,郑有飞,赵国强,陈怀亮.郑州植物物候对气候变化的响应.生态学报,2007,27(4):1471-1479.
[15] 莫非,赵鸿,王建永,强生才,周宏,王绍明,熊友才.全球变化下植物物候研究的关键问题.生态学报,2011,31(9):2593-2601.
[16] 李正国,杨鹏,唐华俊,吴文斌,陈仲新,刘佳,张莉,谭杰扬,唐鹏钦.近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应.生态学报,2013,33(18):5818-5827.
[17] 张强,邓振镛,赵映东,乔娟.全球气候变化对我国西北地区农业的影响.生态学报,2008,28(3):1210-1218.
[18] 白金莲,梅朵.梁志勇.共和盆地农作物发育期对冬季积温变化的响应分析.农业灾害研究,2015,5(7):36-39.
[19] 姚玉璧,王润元,杨金虎,肖国举,张秀云.黄土高原半干旱区气候变化对春小麦生长发育的影响——以甘肃定西为例.生态学报,2011,31(15):4225-4234.
[20] 董智强,潘志华,安萍莉,潘学标,赵沛义.北方农牧交错带春小麦生育期对气候变化的响应——以内蒙古武川县为例.气候变化研究进展,2012,8(4):265-271.
[21] 黄焕平,马世铭,林而达,李迎春,庄恒扬.不同稻麦种植模式适应气候变化的效益比较分析.气候变化研究进展,2013,9(2):132-138.
[22] 穆佳,赵俊芳,郭建平.近 30 年东北春玉米发育期对气候变化的响应.应用气象学报,2014,25(6):680-689.
[23] 田展,梁卓然,史军,FisherG,顾婷婷.近 50 年气候变化对中国小麦生产潜力的影响分析.中国农学通报,2013,29(9):61-69.
[24] 李秀芬,陈莉,姜丽霞.近 50 年气候变暖对黑龙江省玉米增产贡献的研究.气候变化研究进展,2011,7(5):336-341.
[25] 赵秀兰.近 50 年中国东北地区气候变化对农业的影响.东北农业大学学报,2010,41(9):144-149.
[26] 谢立勇,李悦,钱凤魁,赵洪亮,韩雪,林而达.粮食生产系统对气候变化的响应:敏感性与脆弱性.中国人口·资源与环境,2014,24(5):25-30.
[27] 陶生才,许吟隆,刘珂,潘婕,苟诗薇.农业对气候变化的脆弱性.气候变化研究进展,2011,7(2):143-148.
[28] 张建平,赵艳霞,王春乙,何勇.气候变化对我国华北地区冬小麦发育和产量的影响.应用生态学报,2006,17(7):1179-1184.
[29] 刘桃菊,李晖,唐建军,戚昌瀚,陈美球.大麦发育模型及其光敏感参数.生态学报,2007,27(11):4412-4418.
[30] 赵雪雁,王伟军,万文玉,李花.近 50 年气候变化对青藏高原青稞气候生产潜力的影响.中国生态农业学报,2015,23(10):1329-1338.
[31] 祁如英,汪青春,马占良.青稞产量形成的气象条件分析评价.麦类作物学报,2008,28(3):518-522,536-536.
[32] 李萍.西藏林芝地区春青稞产量及其构成因子主成分分析.西南农业学报,2010,23(1):26-29.
[33] 吴宏亚,陈初红,胡俊,毛浓文,张伯桥,马谈斌,陈秀兰,程顺和.西藏青稞研究现状及品种遗传改良进展.大麦与谷类科学,2013,(4):10-15.
[34] 樊秉芸.海北地区青稞新品种(系)的比较与筛选.安徽农业科学,2012,40(22):11219-11220,11286-11286.
[35] 拉本.青稞的民族文化内涵阐释.青海民族研究,2011,22(1):164-166.
[36] 刘翠花,张澈,朗色,李菊,张存."天达 2116"对西藏冬青稞生长发育的影响研究.中国农学通报,2011,27(24):159-163.
[37] 李月梅,高玉亭,杨文辉,陈占全.施肥对青海门源地区青稞产量及经济效益的影响.江苏农业科学,2011,(1):116-117.